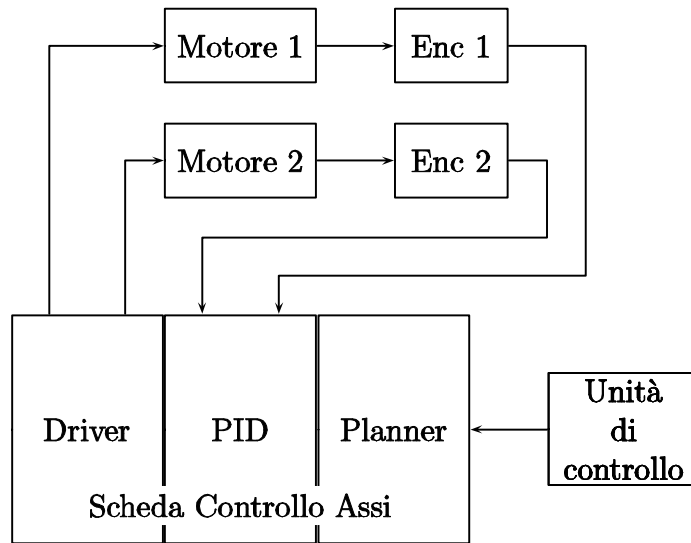


1 Azionamento di un motore CC: nozioni di base ed operative riguardanti driver e pilotaggio

In questo capitolo si forniranno alcune nozioni di base sui motori in corrente continua (motori CC) ed il loro azionamento. Assegnata la specifica di funzionamento si valuterà come scegliere il motore adatto; successivamente si analizzerà il sistema di regolazione e quello di alimentazione. L'ultima sezione raccoglierà tutte le nozioni acquisite in un esempio riassuntivo di scelta e controllo del motore CC.

2 Introduzione

Prima di iniziare a parlare direttamente dei motori CC sembra opportuno accennare alla componentistica presente in laboratorio e familiarizzare con la nomenclatura. Si faccia riferimento al seguente schema.



Schema generale di connessione scheda/driver.

2.1 Motore CC

Il motore CC è il soggetto di questo capitolo e per questo gli viene dedicata la prima sezione dove si introdurrà a grandi linee quali siano i criteri da impiegare nella sua scelta in maniera tale da soddisfare le specifiche di funzionamento.

2.2 Scheda controllo assi e driver di potenza

La *scheda controllo assi* non verrà trattata in dettaglio in questa sede. Nella scheda controllo assi sono generalmente implementati il *planner*, cioè il generatore di traiettoria ed un sottosistema di controllo, ad es. un PID (sistema regolatore proporzionale, integrativo e derivativo). In cascata è presente un *driver* di potenza che accetta come input un segnale in tensione proveniente dalla scheda controllo assi e fornisce in output la potenza necessaria al motore per eseguire il task.

Una scheda controllo assi può comandare più di un motore; attraverso un'unità di controllo (ad esempio un PC) vengono fornite in *input* le coordinate da raggiungere da parte degli attuatori. Questi dati vengono quindi inviati al planner che provvede alla generazione della traiettoria. Nello stadio di controllo la traiettoria viene tradotta per il driver in un segnale di tensione. L'*output* del driver viene infine inviato ai motori.

Per applicazioni non molto sofisticate sono disponibili *microcontrollori*, unità di controllo indipendenti, in luogo di una scheda controllo assi. Per maggiori precisazioni si rimanda al capitolo che tratta l'*Handy-Board*.

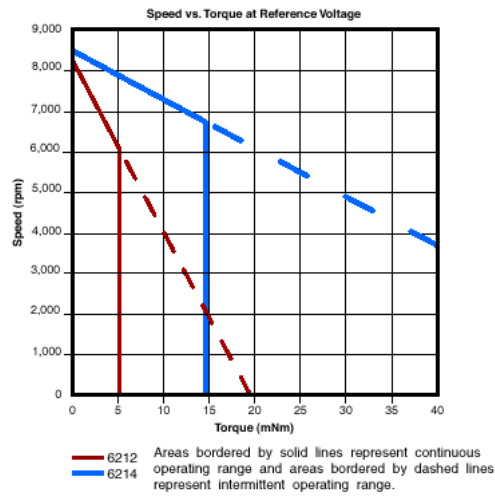
2.3 Encoder

L'*encoder* è un dispositivo per la misura della posizione angolare di un albero rotante; esso è interfacciato con la scheda controllo assi a cui invia con frequenza prefissata la posizione angolare dell'albero; questo dato viene impiegato dallo stadio di controllo per implementare il controllo adeguatamente.

3 Scelta del motore CC

In questa sezione non si intende dare una spiegazione di come funziona un motore CC ma piuttosto fornire i criteri da adottare per scegliere il motore che soddisfa le specifiche di funzionamento richieste.

Nota la *funzionalità* della macchina saranno note anche le specifiche che l'asse da attuare dovrà soddisfare. Matematicamente, queste specifiche consistono in una velocità ω di rotazione nominale ed una coppia T nominale. Generalmente la coppia si ricava dalla soluzione delle equazioni della dinamica del sistema meccanico. ω e T determinano il *punto di lavoro* del motore. Con riferimento alla seguente figura, che si riferisce ad un catalogo di un motore CC, si vede che i costruttori riportano un grafico avente in ordinata la velocità di rotazione ω ed in ascissa la coppia T . La *caratteristica* del motore è rappresentata da una retta, l'area sottostante a tale retta è detta *campo di funzionamento* del motore. Il punto di lavoro del motore deve dunque essere contenuto nel campo di funzionamento.



Caratteristiche di un motore commerciale.

La caratteristica del motore la si può anche ricavare dai dati elettrici forniti da catalogo. Con riferimento alla seguente figura, l'equazione di equilibrio del potenziale del circuito è

$$V = R i + L \frac{di}{dt} + e_m \quad (1)$$

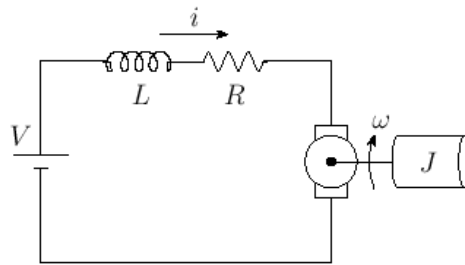
essendo

$$e_m = K_e \omega$$

ed

$$T = K_c i$$

K_c e K_e sono parametri il cui valore è fissato dalle caratteristiche costruttive del motore; si può dimostrare che queste due costanti sono coincidenti e definiscono quindi lo stesso parametro K_t che viene detto *costante di coppia* del motore.

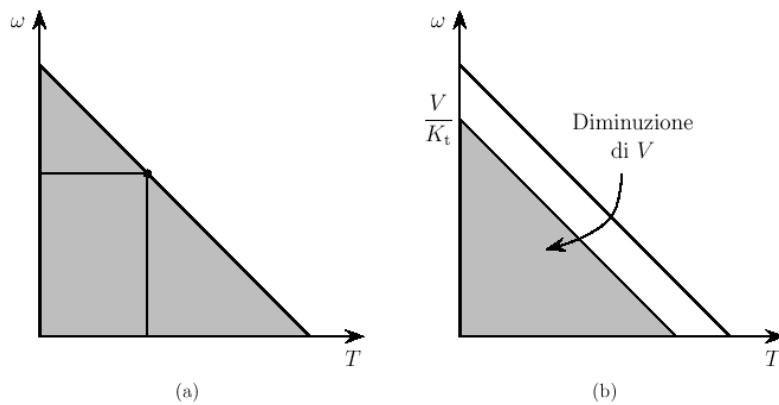


Schema elettrico equivalente di un motore elettrico.

A regime, la velocità del motore è costante pertanto dalla 1 si ottiene per ω la seguente espressione

$$\omega = \frac{V}{K_t} - \frac{R}{K_t^2} T \quad (2)$$

diagrammata nella seguente figura (a)). Si è visto dunque come si può giungere alla curva caratteristica del motore direttamente a partire dai parametri elettrici che lo caratterizzano.



a) Determinazione del punto di lavoro; b) Effetto della variazione di potenziale V .

Si ricorda che l'area del triangolo deve contenere il punto di lavoro al quale il motore deve operare nominalmente. Si vede dalla figura b) come la curva caratteristica di un motore sia funzione della tensione applicata ai capi del motore. Perciò, variando la tensione si varia ad esempio la velocità del motore a parità di carico T applicato.

A volte quando sono necessarie coppie elevate a basse velocità si può utilizzare, accoppiato al motore, un riduttore.

Con l'aggiunta di un riduttore la coppia all'albero aumenta proporzionalmente al rapporto di riduzione τ

$$T_r = \tau T \quad (3)$$

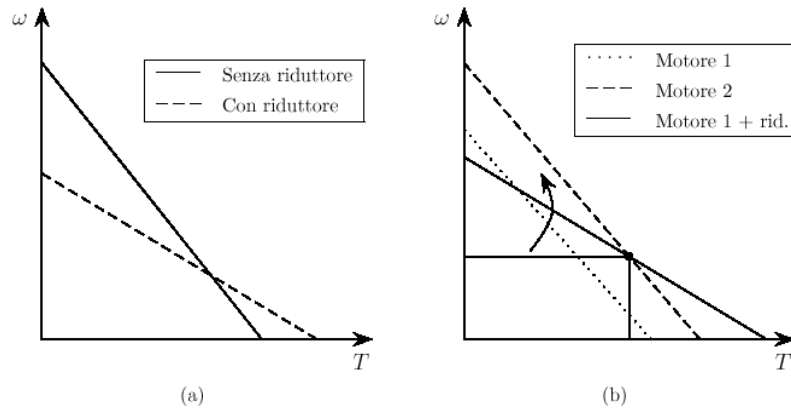
naturalmente $\tau > 1$. Si riduce invece la velocità angolare

$$\omega_r = \frac{\omega}{\tau} \quad (4)$$

sostituendo queste relazioni nella 1, si ottiene

$$\omega_r = \frac{V}{K_t \tau} - \frac{R}{(K_t \tau)^2} T_r \quad (5)$$

L'andamento della nuova curva caratteristica è plottato nella seguente figura (a).



Effetto del riduttore

Si nota che il riduttore ha la capacità di abbassare il termine noto dell'equazione della retta e diminuire la pendenza della retta. In questo modo, un motore elettrico riesce a soddisfare le esigenze di un punto di lavoro che esige coppie elevate a basse velocità. A tal riguardo osserviamo la figura b). Supponiamo di avere a disposizione un motore (Motore 1) la cui curva caratteristica è rappresentata dalla retta a punti. Si nota come il punto di lavoro sia fuori dall'area racchiusa da tale retta. Perciò il Motore 1 non è utilizzabile e bisogna passare ad un motore di stazza superiore (Motore 2). In alternativa, si può aggiungere un riduttore al Motore 1 ed inclinare così la sua curva caratteristica ottenendo lo stesso risultato a minor costo.

4 Driver di potenza

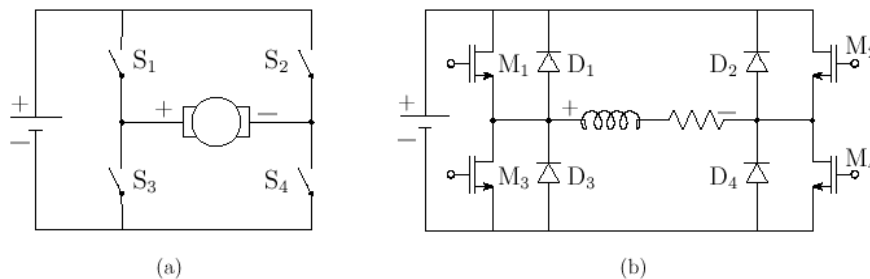
Il segnale di comando all'uscita del regolatore PID, cioè dalla scheda controllo assi, è in generale un segnale analogico in tensione a bassa potenza. Occorre

quindi inserire uno *stadio amplificatore*, capace di gestire elevate potenze, e che si possa comandare mediante segnali a bassa potenza come quello di uscita dal regolatore. Il dispositivo elettronico che assolve questo compito è chiamato *driver*.

Uno dei driver più semplici è il ponte ad H (*H-bridge*); il metodo, qui descritto, usato per il controllo del ponte, si chiama PWM. Tale sistema viene impiegato in laboratorio per l'attuazione di un motore elettrico attraverso la scheda a microcontrollore Handy-Board.

4.1 Ponte ad H

Nella seguente figura vengono riportati lo schema di principio di funzionamento e lo schema reale di un ponte ad H realizzato con *transistor* MOSFET.



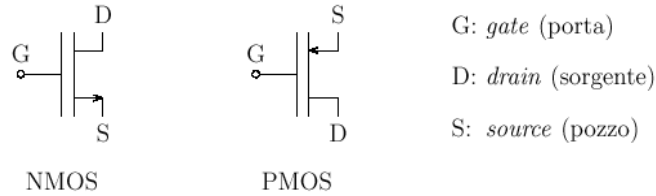
Ponte ad H

Per il carico si è assunta la usuale configurazione ohmico-induttiva che rappresenta il motore. Sostanzialmente, il ponte ad H è costituito da 4 interruttori (i mosfet). Quando l'interruttore S1 ed S4 sono chiusi il motore ruota in un senso. Quando vengono aperti ed al loro posto si chiude S2 ed S3, il motore ruota nell'altro senso. In questo modo il motore assume solo due livelli di velocità dati dalla tensione ai capi dei morsetti. È possibile parzializzare la corrente che fluisce nel motore attraverso una tecnica detta PWM che verrà descritta in seguito. Gli interruttori sono costituiti da mosfet, dispositivi elettronici che hanno la proprietà di condurre solo quando è fornito loro un segnale di bassa tensione al gate (Vedi paragrafo successivo). Si osservi che in antiparallelo ai transistor sono disposti dei diodi. I diodi hanno una funzione di protezione quando il mosfet è soggetto a differenze di potenziale negative molto alte.

4.2 Transistor MOSFET

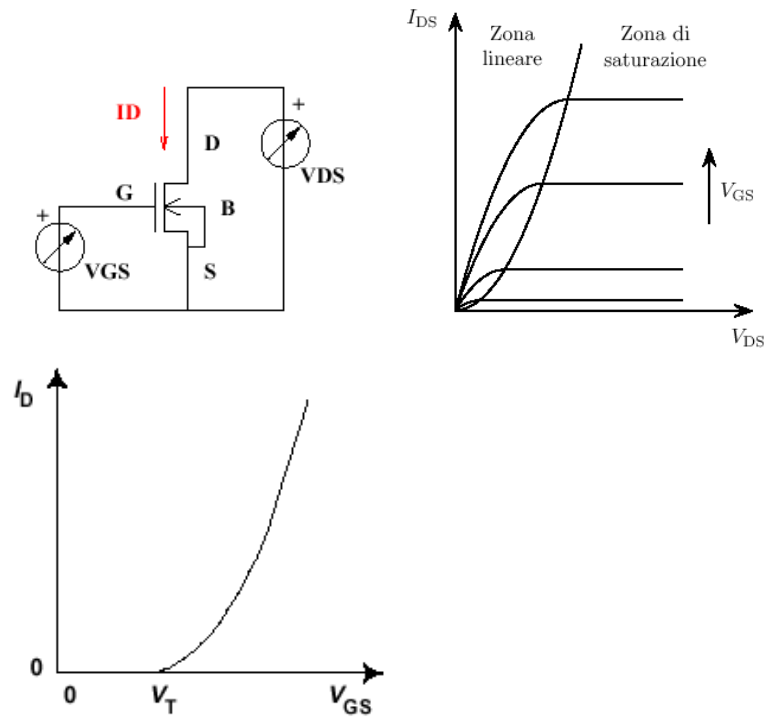
I MOSFET (dall'inglese *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) sono dei transistor realizzati essenzialmente in silicio e si differenziano in base al drogaggio della *regione di canale*, cioè della regione attiva in cui viene fatta fluire la corrente; si distinguono pertanto i MOSFET a canale *n* (o NMOS) e i MOSFET a canale *p* (o PMOS). Senza scendere nei dettagli, in quanto ciò esula

dallo scopo di questo corso, ci si limita a riportare gli schemi circuitali dei due tipi di MOSFET *n* e *p*.



Simbolo per i MOSFET

La freccia uscente dal terminale di source del NMOS indica che la corrente (convenzionale) fluisce dal terminale drain verso il source. Nei PMOS invece il source ed il drain sono invertiti di posizione e questo a causa del fatto che, per un MOSFET a canale *p*, la polarizzazione è tale da portare il source ad una tensione maggiore del drain. La freccia va sempre sul terminale di source, ma è questa volta entrante, per cui indica una corrente (convenzionale) che va dal source verso il drain.



Il funzionamento è descritto in seguito.
 Finché si mantiene nulla la tensione gate-source (V_{GS}), il source ed il drain

sono elettricamente isolati, in quanto non si è ancora formato alcun canale che li colleghi. Lo stesso accade se si applica una tensione V_{GS} non nulla tra gate e source, mantenendola però inferiore alla cosiddetta tensione di soglia V_{TH} . In queste condizioni, dunque, applicando una qualsiasi tensione V_{DS} tra il drain e il source, non si verifica alcun passaggio di corrente.

Il ponte ad H di è realizzato mediante NMOS. Quando al gate è inviato una tensione positiva V_{GS} maggiore della tensione di soglia V_{TH} , l'NMOS si trova in condizione di saturazione e quindi conduce; per cui passa una corrente fra Drain e Source che percorre gli avvolgimenti del motore. Per fronti d'onda negativi invece il transistor è interdetto e quindi non conduce.

Nel grafico è visualizzato l'andamento della corrente di drain in funzione della tensione drain-source al variare della tensione gate-source, tale curva prende il nome di *caratteristica I-V* dell'NMOS. A fianco è riportata la cosiddetta *transfer characteristic I-V* che fornisce invece la dipendenza della corrente dalla tensione gate-source V_{GS} che regola la conduttanza del dispositivo. Naturalmente, questa curva è relativa ad un prefissato valore della tensione V_{DS} .

I MOSFET quando vengono fatti lavorare in saturazione, funzionano da interruttori.

4.3 Controllo PWM

Uno dei metodi impiegati per erogare potenza ad un motore CC consiste nel PWM, dall'espressione inglese *Pulse Width Modulation*, e significa controllo a modulazione di larghezza degli impulsi. Questa modalità può essere impiegata per azionare un ponte ad H. Per semplicità di spiegazione si continuerà usando il termine interruttore piuttosto che mosfet; è chiaro però che il principio logico di funzionamento del PWM rimane lo stesso.

A seconda della configurazione degli interruttori il motore ruota in un verso oppure il contrario secondo la seguente tabella

	S_1	S_2	S_3	S_4
Marcia avanti	on	off	off	on
Marcia indietro	off	on	on	off

Gli interruttori S_1 e S_3 non devono mai essere chiusi simultaneamente, dato che ciò provocherebbe un cortocircuito del generatore di alimentazione e ciò vale anche per gli interruttori S_2 ed S_4 . Nel funzionamento in PWM, il segnale a bassa potenza che arriva all'interruttore, viene generato con un'onda quadra, il risultato sul carico è mostrato nella seguente figura.

Si è visto come un ponte ad H riesce a far ruotare il motore in entrambi i versi, ma sempre ad una velocità costante pari al valore fissato dalla tensione di alimentazione del ponte. Attraverso il PWM è possibile però far variare ugualmente la velocità del motore anche se si ha a disposizione una tensione di alimentazione costante. Vediamo come.

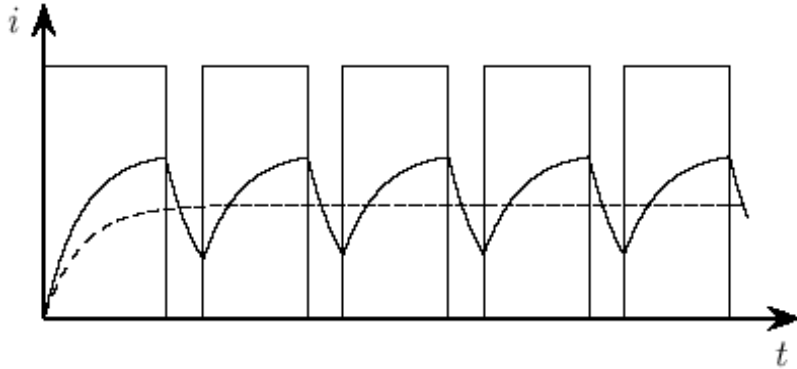


Figure 1:

Si definisce un tempo di ciclo Δt . Δt è solitamente dell'ordine di $0.4 \div 1$ msec. Successivamente si definisce un intervallo di tempo per il quale gli interruttori rimangono aperti Δt_o ed un intervallo per cui rimangono chiusi Δt_c . E' valida la relazione $\Delta t_o + \Delta t_c = \Delta t$. Durante Δt_c il motore è soggetto ad una tensione massima ΔV_{\max} , mentre durante Δt_o la tensione ai capi del motore è nulla. Se Δt_c viene aumentato fino ad arrivare a Δt , allora il motore ruoterà a velocità massima. Al contrario, se Δt_c è nullo, allora il motore rimane fermo, dato che non riceve tensione durante tutto il tempo di ciclo. Per una frazione intermedia, il motore riceverà una frazione intermedia di corrente come rappresentato dalla figura. In questo modo è possibile parzializzare la corrente che arriva al motore e quindi regolarne la velocità.

In altre parole si aumenta o diminuisce il *duty cycle*, ovvero il tempo durante il quale S_1 ed S_3 sono chiusi (on) rispetto al tempo di ciclo

$$duty\ cycle = \Delta t_o / \Delta t$$

da qui il nome di controllo a modulazione di ampiezza degli impulsi PWM.

A seconda della direzione di rotazione del motore cambia la tensione applicata: in caso di marcia in avanti la tensione V_0 applicata al carico può assumere solo due valori $+V$ oppure 0 ; nel caso di marcia indietro i valori possibili sono $-V$ oppure 0 . La forma d'onda della tensione V_0 risultante sul carico è mostrata in figura; essa è costituita da una sequenza di impulsi la cui durata viene modulata per riprodurre al meglio il valore medio della tensione voluto.

In figura è riportato anche l'andamento della corrente. Nell'ipotesi assunta che il carico sia ohmico-induttivo, la corrente di carico i_0 assume il tipico andamento mostrato, costituito da tratti di andamento esponenziale crescente quando la tensione è pari a V e esponenziale decrescente quando la tensione vale 0 . Se la commutazione è piuttosto frequente (qualche KHz) la corrente media è sostanzialmente costante e proporzionale al duty cycle del segnale sul

gate del MOS, come mostrato qualitativamente dalla curva tratteggiata.

4.4 Regolazione di driver commerciali

Un driver è un dispositivo di potenza che aziona i motori. Come input accetta generalmente un segnale in tensione a bassa potenza. L'output è rappresentata dall'alimentazione che va al motore.

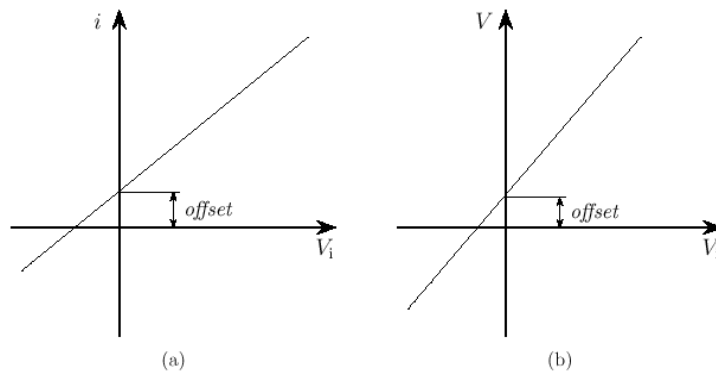
I Driver commerciali consentono una serie di regolazioni che permettono di gestire al meglio le funzionalità del motore oppure di usarlo con motori diversi. In figura si vede un driver di tipo commerciale montato in laboratorio.



Di seguito si riporta una descrizione delle più comuni regolazioni possibili.

4.4.1 Controllo in tensione o corrente

Agendo su di un interruttore (o agendo su di un potenziometro a seconda dei modelli) si può scegliere se controllare la tensione V o la corrente i in uscita dal driver; in entrambi i casi il valore in uscita è legato linearmente alla tensione di ingresso V_i del driver.



Nel caso a) si parla di controllo in corrente. Il driver agisce in maniera tale da regolare la corrente in uscita affinché valga

$$i = k_i V_i$$

dove i è la corrente che arriva al motore.

Dato che in un motore CC la coppia prodotta è proporzionale alla corrente, in questa modalità, il driver agisce generando una coppia linearmente proporzionale alla tensione di ingresso: $Coppia = \propto V_i$.

Nel caso b) si parla di controllo in tensione. Il driver agisce in maniera tale da regolare la tensione in uscita affinché valga

$$V = k_v V_i$$

Dato che in un motore CC la velocità è proporzionale alla tensione di alimentazione del motore, in questa modalità, il driver agisce facendo ruotare il motore ad una velocità linearmente proporzionale alla tensione di ingresso: $\omega = \propto V_i$.

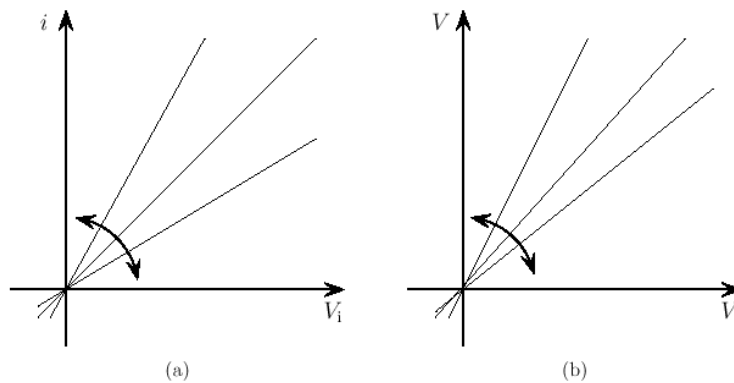
4.4.2 Regolazione dell'offset

Una volta installato il driver può capitare che per tensioni di ingresso nulle, il driver fornisca ugualmente una tensione di uscita. Perciò è necessario regolarlo.

In figura si è indicato con *offset* rispettivamente la corrente e la tensione minima erogata dal driver quando la tensione di alimentazione V_i è nulla. Registrando un potenziometro è possibile eliminare l'offset.

4.4.3 Regolazione del guadagno

A parità di tensione di alimentazione, agendo anche in questo caso su di una apposita vite, è possibile regolare il guadagno in uscita rispetto al guadagno di riferimento, cioè modificare il valore delle costanti k_i e k_v .



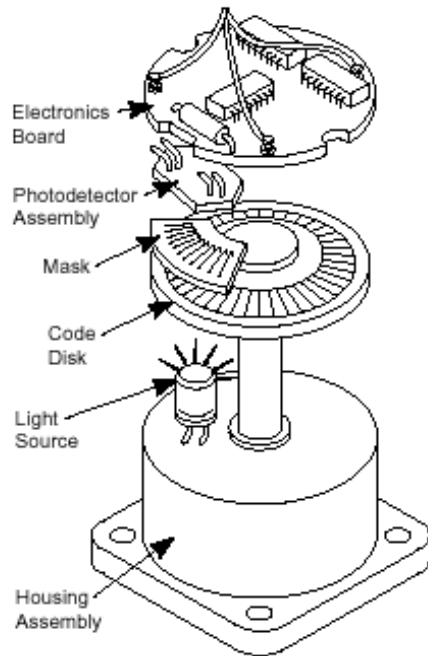
5 Encoder

L'encoder è un sensore che misura un movimento angolare fornendo una serie di impulsi elettrici digitali. Questi impulsi possono essere decodificati in maniera tale da conoscere la posizione angolare dell'asse al quale è calettato l'encoder.

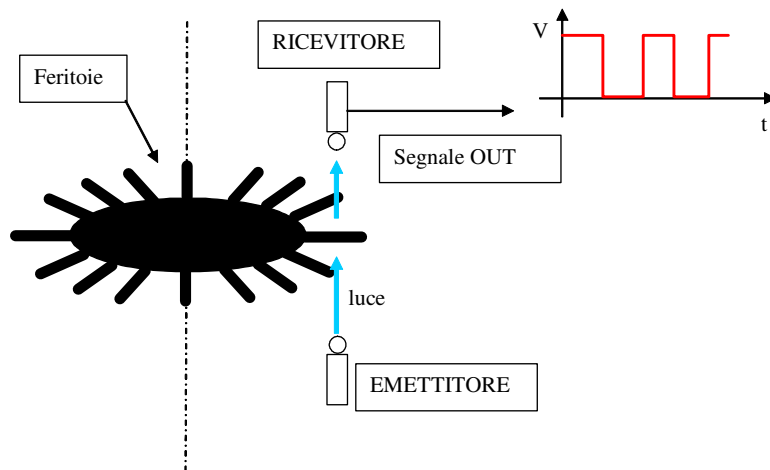
Gli encoder possono essere divisi in due famiglie: gli encoder di tipo *incrementale* nei quali il segnale di uscita è un'onda quadra avente frequenza direttamente proporzionale alla velocità angolare di rotazione dell'asse e gli encoder di tipo *assoluto*: sono dei trasduttori in grado di rilevare la posizione angolare assoluta dell'asse.

5.1 Encoder di tipo incrementale

Il rilevamento del movimento angolare, viene eseguito sul principio della scansione fotoelettrica. Il sistema di lettura si basa sulla rotazione di un disco graduato con un reticolo radiale, formato da linee opache alternate a spazi trasparenti. Il tutto è illuminato in direzione perpendicolare da una sorgente luminosa. Il disco proietta così la sua immagine sulla superficie di vari ricevitori (*fotodiodi*) (vedi figura in basso), opportunamente mascherati da un altro reticolo avente lo stesso passo del precedente chiamato *collimatore*. I ricevitori hanno il compito di rilevare le variazioni di intensità luminosa che avvengono con la rotazione del disco, convertendole in corrispondenti variazioni elettriche. Il segnale elettrico rilevato è costituito da un treno di impulsi, ogni impulso incrementa un contatore nella scheda controllo dati.



Per capire il funzionamento dell'encoder è necessario semplificare lo schema. Si faccia riferimento alla figura seguente

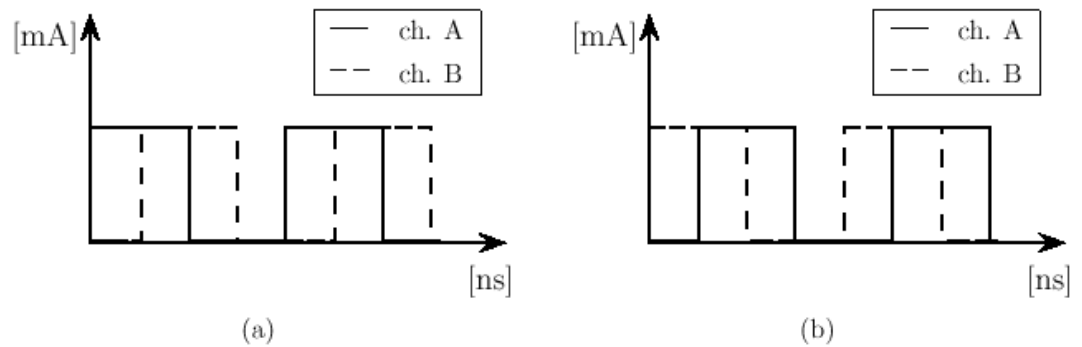


L'albero di cui si vuole misurare la posizione angolare è calettato al disco. Il disco è provvisto di feritoie. Quando il disco ruota (dato che l'albero ruota) il raggio di luce fornito dall'emettitore viene intercettato o lasciato passare a

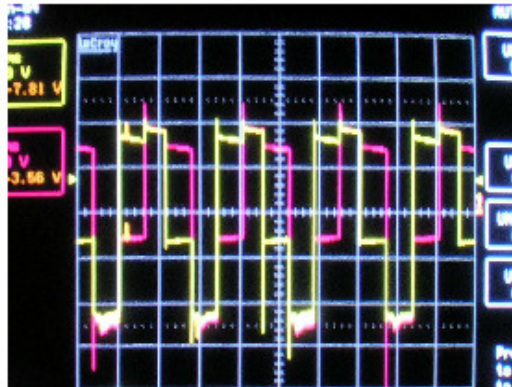
seconda che nel cammino del raggio vi sia la presenza della porzione di disco tra due feritoie contigue o la feritoia. Perciò il ricevitore riceverà una sequenza di impulsi di luce mentre il disco è in rotazione. Questi impulsi vengono convertiti in un segnale elettrico di uscita (vedi grafico in rosso). Il numero di impulsi rappresenta quante feritoie hanno permesso il passaggio di luce, od in altre parole, di quanti passi ha ruotato il disco.

In realtà l'encoder ha un funzionamento più complesso, in quanto, nell'esempio visto non si riesce a distinguere il senso di rotazione del disco. Per cui nella realtà vi sono due emettitori e due ricevitori affiancati. In questo modo è possibile sapere in che direzione sta ruotando l'encoder.

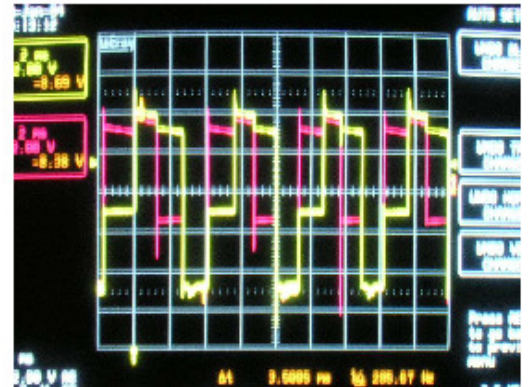
Infatti l'encoder incrementale fornisce normalmente due forme d'onda quadrate e sfasate tra loro di 90° elettrici, le quali vengono fornite ai cosiddetti canale A e canale B. Lo sfasamento è dovuto al fatto che ricevitori e trasmettitori sono vicini. Con la lettura di un solo canale, si ha l'informazione relativa alla velocità di rotazione, mentre mediante l'acquisizione anche del segnale B può essere discriminato il senso di rotazione in base alla sequenza degli stati prodotti dai due segnali. Vedi figura seguente.



Nella seguente figura si vedono invece i segnali come appaiono in realtà sullo schermo dell'oscilloscopio.



(a)



(b)

Il caso a) rappresenta l'encoder che ruota in senso orario. Si vede che quando il canale A passa da 0 ad 1 (in senso binario, cioè il segnale va alto), il segnale B è basso.

Se si inverte il moto si ottiene il caso B. Notare che quando il canale A passa da 0 ad 1, il canale B è alto. Per cui, una scheda di acquisizione è in grado (osservando i due canali contemporaneamente) di identificare il senso di rotazione dell'encoder.

Grazie ad una tacca posta sulla periferia del disco si ottiene un ulteriore segnale, detto *index*, che fornisce una posizione assoluta di zero dell'albero encoder. Questo segnale si presenta sotto forma di impulso squadrato con fasatura e larghezza centrata sul canale A.

Per migliorare la qualità del segnale di acquisizione ciascun segnale, A e B possono avere anche una massa dedicata, rispettivamente \bar{A} e \bar{B} . Gli encoder che non adottano questo sistema, ma hanno una massa comune, vengono detti *single-ended*. Quando i fili superano i 5 m è buona norma intrecciarli in modo da evitare che si manifestino disturbi.

5.2 Encoder di tipo assoluto

Rispetto agli encoder incrementali, gli encoder assoluti presentano importanti differenze dal punto di vista funzionale. Infatti, mentre negli encoder incrementali la posizione è determinata dal conteggio del numero degli impulsi rispetto alla condizione iniziale, negli encoder assoluti la posizione è determinata mediante la lettura del codice di uscita, il quale è unico per ciascuna delle posizioni all'interno del giro. Di conseguenza gli encoder assoluti non perdono l'informazione della posizione assoluta quando viene tolta l'alimentazione (anche in caso di spostamenti). Ad una successiva accensione (grazie alla codifica diretta sul disco) la posizione è aggiornata e disponibile senza dover eseguire, come per gli encoder incrementali, la ricerca del punto di zero.

5.3 Misura di velocità con encoder

Come detto all'inizio, l'encoder è un dispositivo digitale ed in quanto tale fornisce valori discontinui della posizione angolare θ .

Per cui la posizione angolare ϑ_e fornita dall'encoder è soggetta ad un errore di discretizzazione $\Delta\vartheta$

$$\vartheta = \vartheta_e + \Delta\vartheta \quad (6)$$

$\Delta\vartheta$ al massimo è pari all'angolo giro diviso il numero di passi che ha l'encoder. Sia allora Δt il tempo di campionamento con cui si va a leggere la posizione angolare. La velocità dell'encoder può essere stimata attraverso il calcolo

$$\dot{\theta}_s = \frac{\vartheta_{e(i+1)} - \vartheta_{ei}}{\Delta t} \quad (7)$$

dove l'indice si riferisce alle misure effettuate al passo i ed $i + 1$.

Sostituendo 6 su 7, si ottiene

$$\dot{\theta}_s = \frac{\vartheta_{(i+1)} - \vartheta_i}{\Delta t} - \frac{\Delta\vartheta_{(i+1)} - \Delta\vartheta_i}{\Delta t}$$

Si può dedurre dalla formula che, se il tempo di campionamento diminuisce (in questo modo il sistema di controllo diventa più pronto) la stima della velocità è soggetta ad un errore $\frac{\Delta\vartheta_{(i+1)} - \Delta\vartheta_i}{\Delta t}$ che tende a diventare elevato.

Per ottenere un dato significativo della velocità istantanea in uscita, il segnale deve essere filtrato, ovvero eseguire una media pesata degli impulsi. Conseguenza dell'operazione di filtraggio è l'introduzione di un ritardo. Viene da se che se si volesse da questo dato di velocità misurare anche l'accelerazione l'errore che si commetterebbe sarebbe ancora più grande. Pertanto per misure accurate di velocità ed accelerazione si preferisce usare dispositivi analogici quali le *dinamo tachimetriche*, dove la velocità di rotazione ω è semplicemente funzione della differenza di potenziale ΔV .